

学校编码: 10384
学 号: 25320071152206

分类号__密级__
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于扩展卡尔曼预测估计的分散式
结构损伤识别方法

Distributed Structural Damage
Identification base on Extended Kalman estimator

徐志谦

指导教师姓名: 雷 鹰 教 授
专 业 名 称: 结 构 工 程
论文提交日期: 2010 年 5 月
论文答辩时间: 2010 年 6 月
学位授予日期: 2010 年 7 月

答辩委员会主席: _____
评 阅 人: _____

2010 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):
年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博士论文摘要库

摘要

基于结构动力参数的损伤识别是重要的结构损伤诊断的研究方向。由于结构中的损伤在本质上是局部现象,而大型结构系统有众多待识别的参数,因此作为逆问题的损伤识别是具有挑战性且尚未解决的问题。本论文提出将大型结构分散为子结构,并以子结构内部单元动力参数识别为基础,后进行较复杂的结构局部损伤识别的有效识别方法。此方法考虑了结构所受激励部分未知、子结构间存在相互作用、子结构仅观测部分加速度响应(尤其是避免对转角的观测)等造成的动力信息不完备性。

论文首先分析并总结了目前国内外结构损伤识别的研究进展,并在前人的研究的基础上,将用于结构振动控制的卡尔曼预测估计方法推广至用于结构损伤识别的扩展卡尔曼预测估计方法。方法依次采用扩展卡尔曼预测以及最小二乘估计法对结构状态向量,以及未知外激励进行估计,以此识别结构的参数。然后本论文进行了小型结构在激励与响应部分观测下,通过捕捉结构参数(主要是构件的刚度)改变的损伤识别研究。方法的有效性和计算的简便性等,在多自由度桁架、简支梁、悬臂结构、弯剪结构的损伤识别模型中得到验证。之后再将大型结构划分成若干小的子结构,推导每个子结构在外部未知激励和子结构间的“附加未知力”的共同作用下结构损伤识别方法。此方法考虑了在实际应用时,子结构的动力信息不完备,尤其是子结构界面上的响应未能测量的情况。通过 20 层 benchmark 框架、多跨连续梁以及大型桁架结构等模型对方法加以验证。最后,八层剪切框架模型试验分成两个子结构,对不同的损伤情况下的结构损伤参数进行了识别。实验证明,此方法能对实际模型结构不同程度损伤均能有效的识别。

与现有的方法相比,本论文提出的方法通过减少待识别的参数,从而减少大型结构损伤识别的难度。方法还考虑了子结构界面上的响应未能测量以及实际应用时外部激励未知的情况。方法分散识别的特性,还使其能与智能传感网络配合,实现对大型结构损伤的自动识别。

关键词: 结构损伤识别; 部分观测; 未知激励; 子结构; 扩展卡尔曼估计; 实验

Abstract

It has been an important research direction to detect structural damage based on the identification of structural dynamic parameters. However, damage in structures is an intrinsically local phenomenon. As an inverse problem, damage detection of large-size structural system, which involves a large number of unknown parameters, is a challenging problem. In this thesis, structural damage in large-size structures is identified based on the distributed identification of structural dynamic parameter at element level in each substructure of large-size structures. The proposed technique considers un-measured external excitation, incomplete measured vibration data (unmeasured corner response), including structural acceleration responses of substructures are only measured at some degree of freedoms (DOFs).

This thesis first analyzes the structural damage identification research at home and abroad, and derive an approach based on an extended Kalman estimator approach for the extended state vector and the least squares estimation for the unknown inputs, which are proposed to identify the structural parameters under unknown input. This approach comes from Kalman estimator in structural vibration control method. Then the simple structure as the large-scale structure of sub-structures, through the capture of these parameters (mainly the stiffness parameter) changes, can detect structural local damage utilizing only a limited number of measured responses of structures subject to some unmeasured excitation inputs. The efficiency and simple calculation of the method is verified by numerical examples of DOFS truss, beam, cantilevers-type structure, and bending and shear structural damage identification. Then, large-size structure is divided into several smaller sub-structures. We derive damage identification method of each sub-structure, under unknown external excitation and unknown sub-structural interaction excitation. The proposed technique considers incomplete dynamic information of the sub-structure, especially of the un-measured vibration data at the interaction of substructures. Extended Kalman method is verified by numerical examples of 20-story benchmark frame, continuous beams and large truss structural damage identification. Finally, structural damage parameters for the actual model test of eight-story shear frame are identified. Experiments proved the method identifies the actual linear structural damage with

good accuracy.

Compared with the accuracy of other structural damage identification approaches available, the technique proposed in this thesis simplifies the difficulties in the identification of local damage in large-size structural systems by decreasing the numbers of unknown parameters in identification process. It is straight forward which requires less mathematical computation, it also avoids the difficulty of transferring a large amount of measured data in application. The advantage of distributed identification can be implemented by the smart sensor network to realize self-diagnosis of structural damage in large-size structures.

Key words: Structural damage identification; partially measured; unknown inoputs; substructure approach; extended Kalman estimator; experiment

目录

第一章 绪论	1
1.1 本论文研究背景及意义	1
1.2 结构损伤识别目标及方法	2
1.2.1 结构损伤的定义及特征	2
1.2.2 结构损伤识别的目标及方法	3
1.3 输入与输出信息不完备下结构损伤识别研究现状	4
1.3.1 小型结构输入与输出信息不完备下结构损伤识别研究现状	4
1.3.2 大型结构输入与输出信息不完备下结构损伤识别研究现状	5
1.4 本论文主要工作	6
1.4.1 本论文内容	6
1.4.2 本论文的特色与创新	8
第二章 结构物理参数识别相关理论及方法	9
2.1 扩展卡尔曼预测估计方法	9
2.1.1 结构动力系统状态方程	9
2.1.2 基于结构状态方程的动力响应求解	11
2.1.3 扩展卡尔曼预测估计方法	12
2.2 最小二乘估计法	15
2.2.1 时域识别模型	15
2.2.2 时域识别的最小二乘准则	16
2.2.3 最小二乘估计方法	16
2.3 小型结构损伤识别方法	18
2.3.1 基于扩展卡尔曼预测估计的小型结构损伤识别	18
2.3.2 最小二乘法估计未知激励	19
2.3.3 小型结构损伤方法流程图	20
2.4 基于子结构大型结构损伤识别方法	20
2.4.1 大型结构的子结构方法	21
2.4.2 基于扩展卡尔曼预测估计的大型结构损伤识别方法	22
2.4.3 估计子结构的未知激励和“附加未知激励”	24
2.4.4 大型结构的结构损伤识别流程图	26
2.5 本章小结	27
第三章 小型结构损伤识别	28
3.1 小型桁架损伤识别	28
3.1.1 小型桁架动力响应求解	28
3.1.2 小型桁架损伤识别	34
3.2 简支梁损伤识别	39
3.2.1 简支梁动力响应求解	39
3.2.2 简支梁损伤识别	41
3.3 悬臂结构损伤识别	44
3.3.1 悬臂结构动力响应求解	44
3.3.2 悬臂结构损伤识别	45

3.4 弯剪模型数值算例	48
3.4.1 弯剪结构动力响应求解问题	48
3.4.2 弯剪结构损伤识别	50
3.5 本章小结	52
第四章 大型结构损伤识别	53
4.1 20 层 benchmark 算例	53
4.1.1 20 层 benchmark 结构参数及动力响应	53
4.1.2 20 层 benchmark 模型子结构划分及损伤识别	54
4.2 大型桁架算例	59
4.2.1 大型桁架动力响应求解	59
4.2.2 大型桁架子结构划分	61
4.2.3 子结构间未知附加力的推导	62
4.2.4 大型桁架损伤识别	64
4.3 多跨连续梁算例	66
4.3.1 多跨连续梁的动力响应求解	66
4.3.2 多跨连续梁子结构划分	66
4.3.3 子结构间传递力的推导	67
4.3.4 多跨连续梁损伤识别	69
4.4 本章小结	70
第五章 实验研究	71
5.1 振动测试内容介绍	71
5.1.1 振动测试系统的组成	71
5.1.2 振动实验仪器设备介绍	72
5.2 八层框架实验测试	76
5.2.1 实验框架介绍	76
5.2.2 结构阻尼的识别	77
5.2.3 八层剪切框架实验模型的损伤识别	79
5.3 无线智能传感网的结构损伤自动识别	82
5.4 本章小结	84
第六章 总结与展望	85
参考文献	87
附录 攻读硕士学位期间从事的科研项目与科研成果	92
致 谢	92

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background and significance of this treatise.....	1
1.2 Objectives and methods of structural damage identification.....	2
1.2.1 Definition and characteristics of damage.....	2
1.2.2 Structural damage detection target and algorithm	3
1.3 Application of Structural Damage Identification Research.....	4
1.3.1 Status quo of the research on small-scale structural dynamic parameters identification under partially measured input	4
1.3.2 Status quo of the research on large-size structural dynamic parameters identification under partially measured input	5
1.4 Working of Thesis.....	6
1.4.1 Working of Thesis	6
1.4.2 Features and Innovation of this thesis.....	8
Chapter 2 The theory and algorithm of Structural identification of physical parameters.....	9
2.1 Extended Kalman filter estimation algorithm	9
2.1.1 State equation of Dynamic system.....	9
2.1.2 The dynamic response based on Structural state equation.....	11
2.1.3 Extended Kalman filter estimation algorithm.....	12
2.2 Least-square estimation algorithm	15
2.2.1 Model of time-domain identification	15
2.2.2 Least-square base on time-domain identification	16
2.2.3 Least-square estimation algorithm.....	16
2.3 Damage detection algorithm of small-scale structure	18
2.3.1 Damage detection of simple structure base on extended kalman filter	18
2.3.2 Least-square estimation with unknown-input.....	19
2.3.3 Flow chart of simple structural damage detection	20
2.4 Damage detection of Large-scale structure base on substructure	20
2.4.1 Substructure method of Large-scale structure	21
2.4.2 Damage detection of Large-scale structure base on extended kalman filter.....	22
2.4.3 Estimated unknown-input and additional unknown-input of substructure ..	24
2.4.4 Flow chart of sub-structural damage detection	26

2.5 Brief summery of this chapter	26
Chapter 3 Numerical examples of simple structural damage identification.....	27
3.1 Damage identification of small-scale truss numerical example	28
3.1.1 Dynamic Response of small-scale truss.....	28
3.1.2 Damage detection of small-scale truss.....	34
3.2 Damage identification of simply supported beam	39
3.2.1 Dynamic Response of simply supported beam.....	39
3.2.2 Beam damage identification numerical	41
3.3 Damage identification of cantilevers-type structures.....	44
3.3.1 Dynamic Response of cantilevers-type structures	44
3.3.2 Damage identification of cantilevers-type structures	45
3.4 Damage identification of bending shear structure	48
3.4.1 Dynamic Response of Bending shear structure	48
3.4.2 Damage identification of cantilevers-type structures	50
3.5 Brief summery of this chapter	52
Chapter 4 Numerical examples of large-size structural damage identification.....	53
4.1 20-story benchmark example	53
4.1.1 20-story benchmark example	53
4.1.2 Substructure Divide and Damage Identification of 20-story benchmark ..	54
4.2 Numerical examples of large truss.....	59
4.2.1 Dynamic Response of large truss.....	59
4.2.2 Substructure Divide of large truss.....	61
4.2.3 Transfer excitation between substructure	62
4.2.4 Damage Identification of large truss.....	64
4.3 Multi-span continuous beam numerical.....	66
4.3.1 Dynamic Response of Multi-span continuous beam	66
4.3.2 Substructure Divide of Multi-span continuous beam	66
4.3.3 Transfer excitation between substructure	67
4.3.4 Damage Identification of Transfer excitation	69
4.4 Brief summery of this chapter	71

Chapter 5 Experiment	71
5.1 Vibration Testing Content Introduction.....	71
5.1.1 Vibration test system components	71
5.1.2 Vibration test equipment	72
5.2 The experimental test of eight-story framework	76
5.2.1 Experimental framework introduction	76
5.2.2 Identification of structural damping.....	77
5.2.3 Eight-story shear frame for structural damage identification	79
5.3 self-diagnosis of structural damage base on the smart sensor network	82
5.4 Brief summery of this chapter.....	84
Chapter 6 Summary and Outlook	85
References	87
Appendix Research projects and Achievements During the master degree.....	92
Acknowledgements.....	93

第一章 绪论

1.1 本论文研究背景及意义

近几年,我国建成了许多举世瞩目的重大工程,如三峡工程、西气东输、南水北调、青藏铁路、水立方、鸟巢、杭州湾跨海大桥、上海世博会建筑群等。与民众生活息息相关的公共基础设施建设也正向大型化、复杂化方向发展。这些设施将在接下来的几十年甚至上百年内为人们提供服务,为人们带来了极大的便利和财富。但由于环境载荷作用、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化以及其他使用不当的人为因素,建筑物的结构将不可避免地产生损伤积累,抗力衰减,从而导致突发事故,造成的巨大损失。

目前,工程的可靠性一方面是靠合理的设计、正确的施工来保障的。另一方面,是依赖事后维修和定期的维护来实现的。第一种方式由于工程结构体系复杂,认识水平的限制,设计预期性态与实际性态不可避免地存在偏差,同时由于施工水平的限制,也会导致实际结构与设计预想偏差。第二种方式中,事后维修缺乏及时性、主动性;定时维修缺乏目的性、经济性。如高屏大桥事故,事故现场调查结果表明,该桥桥基早已裸露,台风造成河水暴涨,桥基被冲垮,导致大桥下陷断裂^[1]。如果能及时地了解桥的健康状况,则完全可以避免事故的发生。

我国从上世纪年代中期以后开始开展抗震鉴定与加固,近几年来对已有结构的检测、评估已引起工程界的极大重视^[2]。因此,如何通过合理的检测方法对既有工程结构进行健康检测是当前国内外学术界、工程界函待解决的问题。传统的工程结构检测技术一般属于静力和局部检测技术,通常只能针对构件或结构的局部进行检测。由于工程结构体积庞大,构件多,且结构中很多部位无法进入或无法直接观测,因此传统检测技术的应用受到较多的限制。基于动力测试的结构系统识别由于能够通过有限测点信息获得对结构整体特性的较好把握而受到研究者的重视。将高效率、高精度的数字信号分析相结合,基于结构动力学系统的识别正逐步成为工程结构健康检测的重要手段。

近四十年来,结构动力学系统参数识别研究有了很大的进展,国内外提出了许多识别理论与方法。一直以来频域法是结构系统识别的主要方法,许多已取得

的主要研究成果大多集中于结构模态参数识别与结构动力参数修正^[3]。在实际工程的动力检测中,一般能较好地获得低阶模态信息,检测的结构固有频率和振型也较稳定。但在提取模态参数的同时,也丢失了一部分有用的信息,而且由于识别理论和方法本身的局限性,模态参数识别这一中间环节必然会产生新的误差。此外,频域法在低阶模态分析中对结构刚度变化不敏感,对损伤程度不太严重的结构也无法正确识别。关于结构模型的动力修正已提出了许多方法,但迄今为止还没有一个公认的、用于工程实际的成熟方法^[4]。此外,与频域法相比,结构动力学系统的时域识别有两个明显的优势:(1)时域法是一种直接的识别方法,不存在中间过程的误差;(2)实测的输入—输出时域数据包含更丰富结构信息,而且增加时程数据的采样点数能有效地增加时域识别方程的个数。在实际结构检测中,结构动力参数识别具有简单,效率高和检测费用低等优点,基于上述考虑,本论文以结构响应时域信号为基础,采用扩展卡尔曼预测估计以及最小二乘估计法,以此讨论结构损伤识别方法。

1.2 结构损伤识别目标及方法

1.2.1 结构损伤的定义及特征

在国际材料与结构实验学会关于混凝土结构破损分类的推荐草案中,损伤是指结构由于外部力学因素引起的削弱或破损;缺陷是指由于设计、施工错误或材料本身的不完善所引起的结构削弱或破损。其中外部力学因素有荷载作用包括地震、台风等,基础不均匀沉降以及长期使用产生的疲劳作用。自然环境也是产生结构损伤的一个不可忽视的主要原因^[5]。扩展来讲,损伤包括非受力损伤和受力损伤。对于混凝土结构,非受力损伤主要是指在施工过程中带来的缺陷,以及使用过程中因温度、湿度、周围侵蚀性介质腐蚀等非受力因素造成的破损,如混凝土的开裂和碳化、钢筋的锈蚀等。受力损伤是指结构或构件在使用过程中因受力因素而产生的裂缝的出现与开展。从损伤力学的角度来讲,每一次结构的损伤可表征为结构裂缝的出现和扩展、刚度退化或降低、截面削弱、钢筋锈蚀、材料品质劣化等外部特征。结构裂缝的存在在某种程度上决定着结构的可靠性、使用功能

及耐久性,这种损伤通常不会影响结构的质量特性,但对结构的刚度特性和阻尼特性会产生一定程度的影响。

1.2.2 结构损伤识别的目标及方法

由于缺陷和损伤是不可避免的,结构的损伤诊断技术便由此而产生,它是近40多年发展起来的一门新兴学科,是一门适应工程实际需要而形成的各学科交叉的综合学科。1993年 Rytte 定义了结构损伤诊断目标的四个阶段^[6]:

- (1) 确定结构存在损伤;
- (2) 确定损伤的几何位置;
- (3) 定量确定损伤的严重程度;
- (4) 预测结构的剩余使用寿命。

土木工程结构的损伤识别,国外大体上可分为三个阶段,20世纪40年代到50年代为探索阶段,注重对建筑结构缺陷原因的分析和修补方法的研究,检测工作大多数采用目测为主的传统方法;60年代到70年代为发展阶段,注重对建筑物检测技术和评估方法的研究,提出了破损检测、无损检测和物理检测,其中包括超声波法、弹性波法、电磁法、雷达以及红外摄影等几十种现代无损检测技术^[7]。20世纪70年代以后,最初起源于现代控制理论的系统识别的理论,用于结构物理参数识别方面的研究^[8]。

传统的结构检测方法如外观检查、无损检测及抽样调查多用于材料特征以及局部缺陷的检测,一般需要知道损伤的大致部位且可以接近,这种方法所采用的调查手段及其判断准则,很大程度上依赖于检测者的经验及主观判断,也不能从整体上定量把握结构状态。现场静力荷载试验是获取结构信息的一种可靠的检测手段,但工作量大,检测费用高。因此,多年来国内外学者一直在寻找适合于复杂结构的定量整体损伤评估方法,基于结构动力学系统识别的损伤诊断就是一种目前很有发展前途的方法。相对于静态检测技术,动力测试有着简便、无损于结构、获取信息丰富等优点。对于重要结构,利用动力参数测试,便能方便地完成结构破损的在线监测和诊断。

基于动力学损伤识别方法的基本原理是结构的动力特性参数(固有频率、振型、阻尼比)与结构的物理参数(刚度、质量以及材料的本构特征)存在对应的关系。当结构损伤时,物理参数的变化,如刚度降低、质量减少,必将引起结构动

力参数的变化,如结构固有频率降低、阻尼增大、振型的改变等等。因此可通过动力测试来捕捉结构静、动力参数的变化^[9]。

1.3 输入与输出信息不完备下结构损伤识别研究现状

1.3.1 小型结构输入与输出信息不完备下结构损伤识别研究现状

目前对在结构健康监测领域中,对结构损伤识别是国内外研究的热点课题之一。结构损伤方法可分为局部法和全局法两大类。其中基于结构振动信号的结构损伤识别,被认为是一种很有前途的方法。但由于高层建筑、大型桥梁等结构具有型式多样、规模和尺寸大、质量重、使用周期长、载荷条件复杂(交通荷载、风荷载、环境脉动等)的特点,影响结构性能的因素复杂而且多变(比如温度等)、边界条件难以准确模型化、自振频率和振动幅值低且受非结构构件的影响等因素,其损伤识别比一般的机械系统要复杂。要使结构损伤识别在工程领域真正实用化,还有一系列的问题仍未解决。其中结构在自然环境激励条件下的损伤识别,能避免使用昂贵激励设备,进行实际可行的结构损伤识别,是国内外学者致力与研究的课题,且为今后发展的趋势之一^[10-12]。

近 10 多年来,国内外不少学者致力于研究在结构激励或响应部分观测情况下,结构识别与损伤识别的研究。结构识别在理论上属于力学“反问题”^[13],李国强和李杰的专著及李杰等人的相关文献^[14],研究了在输入部分未知下,利用观测的结构响应,或者基于微积分数值计算,得到结构全部响应,进行结构参数识别的复合反演(力学反问题)的补偿算法,包括应用统计平均法对基底输入未知时的结构参数识别,基于风荷载相关性和分组平均对风荷载未知时结构参数的识别。谢献忠和易伟建等也在此基础上探讨了在部分输入未知条件下结构动力复合反演的分解算法^[15],陈健云等也深入研究了补偿算法的实质,提出了部分输入未知条件下的二阶段识别方法^[16]。但这些方法仍需要对结构响应状态进行观测。X. Zhao 和 Y. L. Xu 等研究了结合地震力对结构基本模态识别,进行多层剪切框架在基底未知输入下识别的混合识别方法^[17]。此外,国内已有学者探讨只估计结构参数的缩减变量的 Kalman 滤波方法^[18]或基于微分/积分算子变换方法^[14],但这些方法也依赖于对结构状态向量的观测。在国外, A. Halder 等人从 90 年代开始对未知激励与局部观测情况下的结构识别与损伤识别开展了系列研究^[19-21]。他

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库